

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17770

研究課題名(和文) 太陽風磁気流体波による乱流スペクトル異方性の生成過程

研究課題名(英文) Generation processes of spectral anisotropy of turbulence by magnetohydrodynamic waves in the solar wind

研究代表者

成行 泰裕 (Nariyuki, Yasuhiro)

富山大学・人間発達科学部・准教授

研究者番号：50510294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽風プラズマ中の磁気流体波の非線形発展過程が乱流スペクトル異方性の生成に与える影響を議論するため、理論モデルの導出および直接数値計算を行った。圧縮性擾乱とイオン運動論効果双方を含む3次元モデルを導出し磁気流体波の非線形発展の数値計算を行った結果、ランダウ減衰効果が大きいほど斜め伝搬波の励起が抑制されること、順カスケードに伴う高波数成分の励起よりもサイクロトロン減衰効果が顕著になることで相対的に斜め伝搬成分が卓越し得ることがわかった。また、理論モデルの前提条件として用いられる局所平衡状態について、粗視化スケールの波動の効果およびイオン運動論効果を含む場合の熱力学的性質を示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study is to discuss contributions of nonlinear evolution of Alfvén waves to generation of developed magnetohydrodynamic turbulence in the solar wind plasma. We derived a theoretical model including both ion acoustic waves and ion kinetic effects and carried out direct numerical simulations of the resultant model. Numerical results show that ion Landau damping effects suppress the excitation of obliquely propagating daughter waves. On the other hand, obliquely propagating waves can be dominant, since ion cyclotron damping suppress the growth of parallel higher wavenumber modes. We also indicated thermodynamic properties including effects of wave dynamics in the coarse-grained scale / ion kinetic effects.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：太陽風 磁気流体乱流 アルヴェン波

### 1. 研究開始当初の背景

太陽風プラズマが定常・一様な層流ではなく、非定常・非一様な磁気流体(MHD)乱流で構成されていることは、人工衛星による「その場」観測により確認されている。太陽風プラズマ中の MHD 乱流は宇宙空間を伝搬する高エネルギー粒子(宇宙線)の運動を複雑に変化させるが、その拡散過程は乱流の性質に大きく影響される。しかしながら、太陽風 MHD 乱流の性質には未解明な点が多く、標準的な物理モデルは構築されていない。特に、背景磁場に対する擾乱スケール(エネルギースペクトル)の異方性は太陽風 MHD 乱流の顕著な特徴であり、太陽風プラズマが地球へ到来する間のエネルギー・運動量収支を解明する上でも、必ず理解しなければならない性質である。

### 2. 研究の目的

過去の衛星データ解析研究より、太陽から太陽風としてプラズマ塊が出た後、時間経過とともに背景磁場に対し平行伝搬する磁気流体波(アルヴェン波)を多く含む状態から、垂直伝搬方向の波数を含む状態へ MHD 乱流が遷移することが示されている。本研究は、太陽表面で励起された磁気流体波が乱流のエネルギースペクトル異方性を生成する物理過程の解明を目指す。具体的には、圧縮性非線形波動の立場からスペクトル異方性の生成過程を捉え直し、過去の理論モデルを統合した新しいモデルの導出・解析を通じて、磁気流体波の非線形発展における競合するエネルギーカスケード過程の解明に取り組む。

### 3. 研究の方法

本研究では、磁気流体波の非線形発展を議論するため、(1)理論モデルの導出・検討(2)モデルの直接数値計算をそれぞれ実行する。(1)については、これまで同時に論じてこられなかった複数の効果(イオン音波モード、イオン運動論減衰効果など)を含むモデルの構築、及びモデル導出の前提にされる背景プラズマの磁気流体近似についての吟味を行う。(2)については、導出した理論モデルの簡約化モデル及び3次元モデルの直接数値計算を行い、得られた数値データの解析を行う。

### 4. 研究成果

本研究を通じ、以下のような成果が得られた:

(1)過去の研究ではイオンビームを波動の駆動源と考えている場合も等方圧力を仮定していたが、物理的な整合性を保つためにはビームの影響を圧力項にも反映させなければならない場合がある。そこでまず、複数のイオン成分を含む太陽風プラズマを一流体的

な描像で取り扱った場合に現れる見かけの温度(圧力)について検討を行い、等方プラズマを仮定した系から拡張されるべき点を明確にした(論文)。

(2)密度揺動の時間発展とイオンの運動論効果を同時に含む系(Kinetically modified Triple-degenerated derivative nonlinear Schrodinger equation; KTDNLS)が既存の運動論的流体方程式と整合する条件について検討を行い、1次オーダーの比熱比を流体系の比熱比でモデル化することで現象論的にパラメータを決定できることを示した。さらに、導出した系を用いて垂直方向のエネルギーカスケードに必要な横方向の不安定性の不安定領域が運動論効果によって拡大することを示した(論文、学会)。

(3)Ruderman(POP, 2002)で導出されたランダムな密度揺動を含んだモデルを用いて、静電的な熱揺動などの特定のスペクトルを持つ揺動が分散項の形で方程式系に現れることで変調不安定性に影響を与えることを示した(学会)。

(4)背景の平衡分布として「見かけの温度」が含まれる場合のアルヴェン波の性質について議論を行った。最も簡単な近似として太陽風中の WKB 的な径方向発展を考えた場合、比熱比 3/2 の背景流体として扱えることが分かった。一方で、WKB 近似よりも見かけの温度も含めて比熱比 5/3 の流体と見なした場合の方が見かけの温度の径方向発展は Helios 衛星により観測値に近いことが分かった。平衡分布として「見かけの温度」を近似した場合のアルヴェン波の不安定性について線形解析を行った結果、実空間のフィルター関数の形状に由来する人工的な振動が解に現れること、その人工的な振動はアルヴェン波の波長とフィルター幅が十分スケール分離されていれば無視することが出来ることが分かった。また、アルヴェン波による見かけの温度と本物の温度が同オーダーの場合の実効的な比熱比を求める表式を導出した(論文、学会)。

(5)運動論効果により流体理論から大きく修正される非共鳴粒子の寄与 [Spangler, POF, 1989]について、半理想気体の比熱を用いた経験モデルを求めた。運動論から導かれた非線形アルヴェン波の振幅変調に伴う密度揺らぎの表式を低温極限で展開することで、温度依存性を持つ比熱比を導出し、経験モデルの妥当性を確認した。さらに、非線形アルヴェン波の運動論的な比熱に対する経験モデルを太陽風温度の径方向発展へ適用し、モデルから得られた径方向発展が観測結果とよく一致し得ることを示した。運動論効果により現れる共鳴粒子(ヒルベルト変換)の項を

磁場ゆらぎ-密度ゆらぎの相関部分からのランダムなずれ(確率変数)とみなしモデル化できることを示した(学会 )。

(6)イオンビーム不安定性によるアルヴェン波の励起を模した励起項とサイクロトロン減衰を模した減衰項を含んだ非線形モデル(Derivative nonlinear Schrodinger equation; DNLS)のアルヴェン波解におけるカオス的な磁場の振る舞いを記述するモデル(Hada et al, Phys. Fluid B, 1990)の直接数値計算を行い、減衰項の効果が大きいほど、磁場のフーリエモード間の位相相関が小さいことを示した。一方で、マルコフ性を仮定した近似式を森の射影演算子法を用いて導出し、直接数値計算データと比較した結果、非ガウス性を示す位相相関指数が大きい場合の方が近似式と数値データの相関が高いことがわかった。このことは、位相相関指数で用いているモンテカルロ検定では把握できない非ガウス的な性質の存在を示唆している。このような擾乱の統計的性質は(3)で述べた「見かけの温度」の熱力学的性質を定義する際にも重要であり、観測データから背景場を定義する際にも注意を払う必要がある(論文 )。

(7)3次元の流体モデル(KTDNLS)の直接数値計算を行い、アルヴェン波の非線形発展の解析を行った。従来知られていたように偏波およびベータ比に対する不安定性の依存性があるが、DNLSの極限(アルヴェン速度と音速が同オーダー)においては斜め伝搬波動の励起が強いこと、ランダウ減衰により斜め伝搬波動の励起が抑制されること、を示唆する計算結果が得られた。加えて、サイクロトロン減衰を模擬した減衰項がある場合でも運動論減衰(非線形ランダウ減衰)の効果が強いほど斜め伝搬波動の励起に伴うアルヴェン波の減衰が抑制されることを確認した。一方で、サイクロトロン減衰の影響が大きい場合でも、低周波の有限振幅擾乱がある場合は平行方向の高波長成分の生成(順カスケード)が進行することがわかった。磁場エネルギーの異方性については、順カスケードに伴う高波数成分の励起よりもサイクロトロン減衰効果の方が顕著になることで、相対的に斜め伝搬成分が卓越し得ることがわかった。この結果は、運動論的な減衰過程のために、太陽風中で磁気流体波によるエネルギーカスケードが生じていてもスペクトル異方性の生成への寄与が小さい場合があることを示唆している(学会 )。

(8)(7)の数値計算データを用いて磁気圧のサブグリッドスケール項を用いてエネルギーカスケードを直接評価する方法を考案し、波数スペクトルのカスケード(波数モード間の近隣相互作用によるエネルギー輸送)を特

徴付ける空間スケールの定量化を行った(学会 )。

(9)KTDNLSにおけるイオン音波等の効果をDNLS系に対する擾乱項と捉えて、DNLS系のソリトン解に対応する固有値を数値逆散乱法により計算し、アルヴェン波の非線形発展につれて複素固有値の各成分に対するパラメータ平面における散乱行列の大きさが変化することを示した(学会 )。

(10)(5)で求めた比熱比の経験式を膨張箱モデルへ適用し、膨張効果・運動論効果双方を含む非線形モデル(DNLS)を求め、直接数値計算を行った。その結果、膨張効果・運動論効果双方がある場合のみにアルヴェン孤立波が崩れ小振幅の波列が生成されることがわかった(学会 )。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4件)

Y. Nariyuki, Isotropic pressure model in the presence of coarse-graining scale Alfvén waves and its consequence for modulational instability, *Physics of Plasmas*, 24, 92903 (2017) DOI: 10.1063/1.4998621 査読あり

Yasuhiro Nariyuki, Makoto Sasaki, Naohiro Kasuya, Tohru Hada, Masatoshi Yagi, Phase coherence among the Fourier modes and non-Gaussian characteristics in the Alfvén chaos system, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 3, 033J01 (2017) DOI: 10.1093/ptep/ptx016 査読あり

Yasuhiro Nariyuki, Kinetic density fluctuations associated with envelope-modulated Alfvén waves in a solar wind plasma, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 4, 043J01 (2016). DOI: 10.1093/ptep/ptw035 査読あり

Y. Nariyuki, T. Umeda, T. K. Suzuki and T. Hada, Note on one-fluid modeling of low-frequency Alfvénic fluctuations in a solar wind plasma with multi-ion components, *Physics of Plasmas*, 22, 124502 (2015) DOI:10.1063/1.4936798 査読あり

〔学会発表〕(計 16 件)

成行 泰裕, 膨張箱モデルを用いた非一様プラズマにおける磁気流体波の非線形発展の解析, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年

成行 泰裕, 太陽風プラズマ中の圧縮性乱流の性質, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年

成行 泰裕, 一方向伝搬する太陽風磁気流体波のカスケード過程, 平成 29 年度 ISEE 研究集会太陽圏宇宙線シンポジウム, 2018 年

成行 泰裕, 非局所的な散逸項を含む非線形磁気流体波モデルの数値実験, 第 363 回生存圏シンポジウム RISH 電波科学計算機実験シンポジウム, 2018 年

成行 泰裕, 太陽風磁気流体波の多次元的な非線形発展と自己組織化, Plasma Conference 2017, 2017 年

成行 泰裕, 太陽風プラズマ中の見かけの温度の熱力学的性質: ポリトロープモデル, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2017 年秋学会, 2017 年

成行 泰裕, Nonlinear evolution of solar wind Alfvén waves: An empirical model of the ion kinetic effect, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年

Yasuhiro Nariyuki, Equilibrium velocity distributions including the wave dynamics and nonlinear Alfvén waves in the solar wind, EGU General Assembly 2017, 2017 年

成行 泰裕, 見かけの温度を含む非線形アルヴェン波の理論モデル, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 2016 年 09 月 16 日

成行 泰裕, アルヴェン波の非線形発展における見かけの温度を含む平衡速度分布の効果, 日本惑星地球科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 2016 年 05 月 25 日

成行 泰裕, J. J. Seough, アルヴェン波の変調不安定性に対するランダム揺動の影響, 平成 27 年度 STE 研究集会「宇宙プラズマのフロンティア～太陽圏を越えて」, 名古屋大学 宇宙地球環境研究所, 2016 年 3 月 3 日

Yasuhiro Nariyuki, Jungjoon Seough, Effects of density fluctuations on nonlinear evolution of low-frequency Alfvén waves in solar wind plasmas, AGU Fall meeting 2015, Moscone Center, San Francisco, 2015 年 12 月 15 日

成行 泰裕, Seough Jungjoon, ランダムな密度揺動を含む太陽風プラズマにおける円偏波アルヴェン波の変調不安定性, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 138 回総会及び講演会, 小柴ホール(東京大学理学部 1 号館 2 階), 2015 年 11 月 3 日

成行 泰裕, 徐 正準, 熱的擾乱を含む非線形磁気流体波の理論モデル, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大, 2015 年 9 月 17 日

Y. Nariyuki, Nonlinear evolution of uni-directional nonlinear magnetohydrodynamic waves in solar wind plasmas: A kinetic-fluid model, IUGG 2015 General Assembly, Prague Congress Centre, 2015 年 6 月 26 日

成行 泰裕, 運動論的な圧縮モードを含む非線形磁気流体波の理論モデル, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 24 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://evaweb.u-toyama.ac.jp/html/100000192\\_ja.html](http://evaweb.u-toyama.ac.jp/html/100000192_ja.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成行 泰裕 (NARIYUKI, Yasuhiro )  
富山大学・人間発達科学部・准教授  
研究者番号: 50510294

(4) 研究協力者

徐 正準 (SEOUGH Jungjoon )  
富山大学・人間発達科学部・外国人特別  
研究員(-2016.09)  
Korea Astronomy and Space Science  
Institute  
Postdoctoral Researcher(2016.10-2017.09)  
Associate Researcher(2017.10-)